

## **ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ**

Порошковая металлургия, а вслед за ней металлургия гранул в совокупности с технологиями обработки давлением новых материалов - выдающиеся достижения конца второго тысячелетия. Развитие новой технологии обусловлено возможностью быстрого и дешевого способа придания формы готовому изделию. Кроме того, этот путь открывает новые перспективы в материаловедении, так как ряд сплавов с особыми физико-механическими свойствами, высокой однородностью химического состава и структуры может быть получен только путем порошковой или гранульной металлургии.

Под руководством академика А.Ф. Белова в ВИЛСе разработан ряд эффективных для авиационной промышленности технологий получения и обработки гранул жаропрочных сплавов, в частности в газостатах. Намечены пути улучшения структуры и повышения уровня механических свойств готовых изделий из гранулированных заготовок.

В данной работе обсуждаются новые способы пластической деформации для компактных и некомпактных материалов без особого изменения формы осесимметричных изделий, а также некоторые результаты их исследования.

Суть пластической деформации без изменения формы заключается в инициировании сдвиговой деформации [1-3], при этом размеры заготовки либо не изменяются совсем, либо незначительно. На примере осесимметричных заготовок (сплошные цилиндры, втулки или кольца) могут быть предложены восемь вариантов нового процесса обработки их в контейнере с применением пуансона, а для полых заготовок - дополнительно с иглой (рис. 1, а, б). Пластическая деформация заготовки инициируется вращением одного из элементов системы "верхний пуансон - контейнер с нижним пуансоном - игла". Наиболее простой вариант (отсутствие вращения всех трех элементов оснастки) известен как обычная схема сжатия некомпактной заготовки в контейнере (матрице), он получил распространение в промышленности, однако не всегда эффективен для однородного уплотнения, достижения требуемой структуры и свойств материала.

Три других возможных варианта обработки цилиндров можно считать равнозначными для осуществления способа. Разница в том, что вращению подвергают либо верхний пуансон, либо контейнер с нижним пуансоном, либо оба элемента оснастки, но в различном направлении. Последний вариант практически наиболее сложен. При обработке полых заготовок, когда оба пуансона не вращаются, а вращению подвергают либо контейнер, либо иглу, также равнозначно получают высокое качество изделия. Большей однородности уплотнения можно достичь, если для каждого из этих вариантов обеспечить вращение одного из пуансонов. Иногда эффективно знакопеременное закручивание заготовок в контейнере.

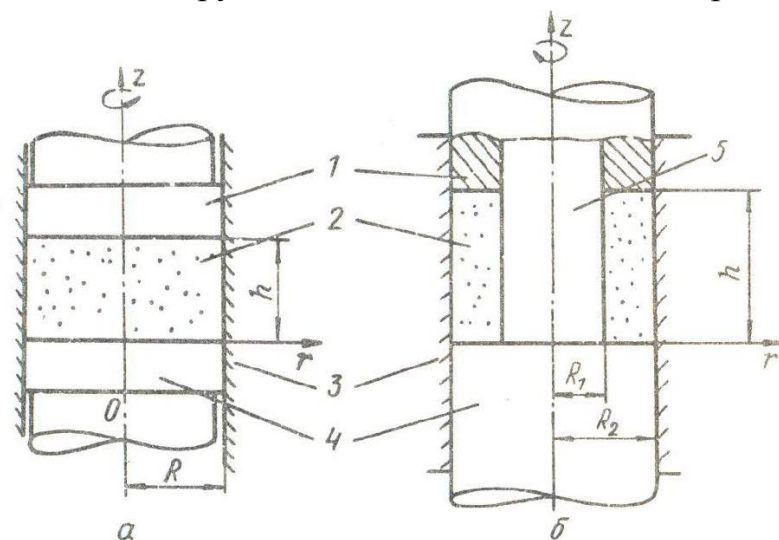


Рис. 1. Схема сжатия в контейнере с закручиванием заготовки без отверстия (а) и с отверстием (б):

1 - активный пуансон; 2 - заготовка; 3 - контейнер;  
4 - неподвижный пуансон; 5 - игла.

При изучении предложенного способа пластической деформации без изменения формы авторами выполнен обширный комплекс работ, связанных с теоретическим обоснованием процессов закручивания как сплошных, так и порошковых заготовок в контейнере, а также проведены эксперименты для проверки результатов теоретических изысканий.

Выявлено, что применительно к цилиндрическим заготовкам из компактного металла процесс возможен лишь в том случае, если на двух контактных поверхностях имеет место хотя бы частичное прилипание, а на других поверхностях происходит скольжение. Условие надежности процесса закручивания цилиндрической заго-

товки в контейнере с использованием принципа минимума полной мощности сформулировано в работе [4] и выглядит так:

$$\tau_2 > \tau_s + 3(h/R)\tau_1/2, \quad (1)$$

где  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – напряжения трения соответственно на контейнере и активном пуансоне;  $\tau_s$  – сопротивление деформации на сдвиг;  $h$ ,  $R$  – высота и радиус заготовки.

Однако напряжение трения не может превышать предела текучести деформируемого материала на сдвиг, поэтому, как это следует из формулы (1), для идеально пластического материала осуществить такой процесс нельзя. Для неупрочняющегося материала энергетически более приемлем сдвиг в локальной области на контакте с активным пуансоном, а большая часть объема заготовки остается недеформированной. Для упрочняющегося материала, как показали опыты, результаты которых опубликованы [5], процесс деформации сдвига распространяется на весь объем заготовки. Механизм этого явления заключается в послойной деформации слоев металла, начиная со слоя, примыкающего к активному инструменту, упрочнения слоев от этих сдвигов и распространения "волны" деформации в глубь металла. Для деформируемой среды со степенным упрочнением  $\tau_s = g\Lambda^b$ , где  $\tau_s = g\Lambda^b$ , где  $\Lambda = \beta r/h$  – степень деформации сдвига, а  $\beta$  – угол закручивания заготовки, условие (1) преобразуется к виду [4]:

$$\tau_2 > \frac{3\left(\frac{gR}{h}\right)^b}{b+3} + 0,5\tau_1 h/R. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что при достижении некоторого значения угла закручивания  $\beta = \beta_*$  процесс прекращается, что подтверждено экспериментально. Из этих же опытов выявлено, что в случае больших значений  $h/R$  деформация сдвига при закручивании заготовки в контейнере затухает по направлению от активного пуансона к неподвижному, в результате чего объем разделяется на пластическую и жесткую зоны. Выполненный в работах [6, 7] анализ позволил сделать вывод о том, что высота жесткой зоны может быть найдена из уравнения:

$$h_2/h = 1 - 0,25(R/h)/\psi, \quad (3)$$

где  $\psi$  – коэффициент трения по Зибелю ( $\tau = \psi\tau_s$ ) на поверхности контейнера и неподвижного пуансона. Отсюда следует, что при увеличении напряжения трения на этой части поверхности опасность появления жесткой зоны возрастает. Это наглядно иллюстрирует рис. 2, где представлены линиями результаты расчета по



формуле (3), а точками - экспериментальные значения, удовлетворительно согласующиеся с расчетами при  $\psi = 0,2$  для процесса со смазкой и при  $\psi = 0,8$  без смазки.

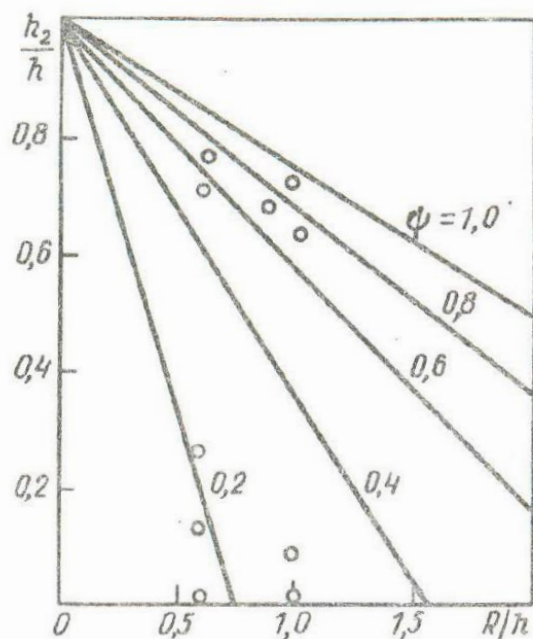


Рис. 2. Зависимость относительной высоты жесткой зоны от показателя трения по Зибелю и отношения  $R/h$ .

Заслуживает внимания процесс со знакопеременным закручиванием заготовки, когда степень деформации сдвига на отдельном этапе (размах знако-переменной пластической деформации) не превышает величины  $\Lambda_i < \beta_* r/h$ , где  $\beta_*$  - критическое значение угла закручивания, при котором процесс прекращается из-за локализации деформации в приконтактном слое у активного пуансона. Эффективность такого процесса подтверждают результаты исследования сопротивления деформации и пластичности сталей и сплавов [8]. В начале нагружения металл значительно упрочняется, однако в последующем интенсивность упрочнения падает. При знакопеременной деформации после каждого очередного и в начале следующего этапов величина сопротивления деформации в соответствии с эффектом Баушингера уменьшается, интенсивность упрочнения на каждом последующем этапе превышает соответствующее значение на предыдущем, что связано с известным принципом Мазинга. В опытах установлен эффект циклического разупрочнения. Таким образом, при знакопеременной деформации из-за увеличения коэффициента упрочнения на каждом последующем этапе в соответствии с формулой (2) устойчивость предложенного процесса возрастает, а крутящий момент, необходимый для закручивания заготовки в контейнере, в связи с эффектом циклического разупрочнения снижается.

Известно, что с уменьшением показателя напряженного состояния  $\sigma/T$  (относительное среднее нормальное напряжение) и показателя Лоде  $\mu_\sigma$  пластичность металла при монотонной и квазимонотонной

деформации повышается. Для рассматриваемого процесса закручивания заготовки при сжатии в контейнере оценочные значения  $\sigma/T$  можно получить из условия идеальной пластичности Мизеса

$$(\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 = \sigma_s^2,$$

если использовать понятия коэффициента бокового давления

$$\chi = \sigma_{rr}|_{r=R} / \sigma_{zz}|_{r=R}.$$

$$\frac{\sigma}{T} = -\frac{1}{3} \frac{1 + 2\chi}{\sqrt{\frac{1}{3}(1 - \chi)^2 + \sigma_{\varphi z}^2 / \sigma_{zz}^2}}$$

$$\mu_\sigma = -\frac{1}{3} \frac{1 - \chi}{2 \sqrt{(1 - \chi)^2 / 4 + \sigma_{\varphi z}^2 / \sigma_{zz}^2}} \quad (4)$$

Интересно, что при  $\chi=1$  и  $\sigma = 0$  (рис. 3) в соответствии с выражениями (4) значение  $\sigma/T$  стремится к минус бесконечности, что соответствует равномерному сжатию заготовки в контейнере.

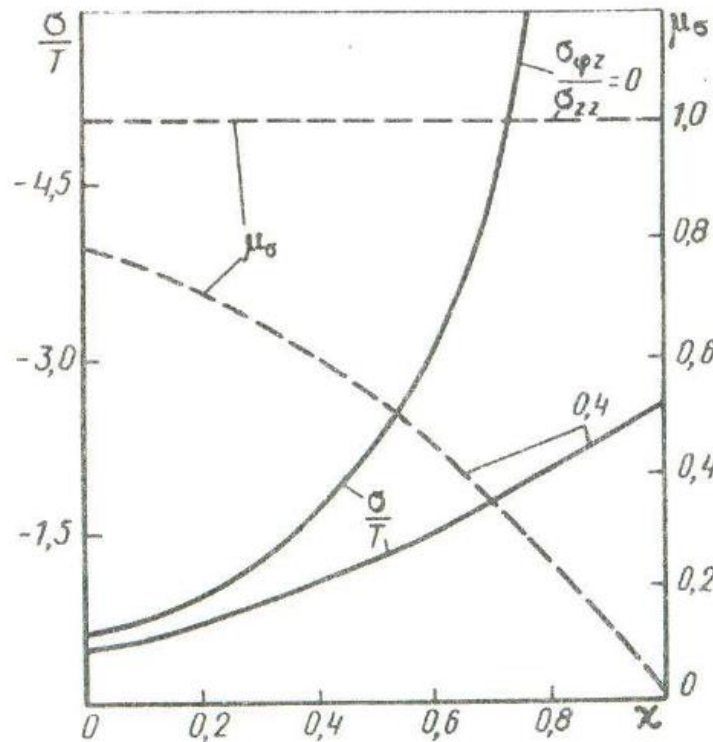


Рис. 3. Влияние коэффициента бокового давления и величины касательных напряжений на показатель напряженного состояния и коэффициент Лодэ.

Однако при сжатии пористых заготовок коэффициент  $\chi$  меньше единицы, и величина его зависит от плотности материала заготовки, поэтому в реальных процессах показатель  $\sigma/T$  имеет отрицательное конечное значение. С понижением напряжения сжатия до нуля при

любом показателе как  $\sigma/T$ , так и  $\mu_\sigma$  стремятся к нулю. Очевидно, что для обеспечения достаточно высокого уровня пластичности деформируемого металла следует находить оптимальное значение.

Необходимый для скручивания заготовки активным пуансоном момент  $M$  может быть найден из условия баланса мощностей внутренних сил, сил трения и подводимой мощности:

$$M = (2/3)\pi R^3(\tau_s + 3h/2R\tau_1), \quad (5)$$

что в частном случае при отсутствии трения на стенке контейнера соответствует известной формуле, справедливой для случая закручивания стержня.

Одной из центральных научных проблем при исследовании процесса компактирования порошков является определение изменения плотности некомпактного материала и установление режимов деформации, обеспечивающих достижение однородной плотности заданной величины во всем объеме заготовки.

Влияние параметров нагружения при закручивании заготовки в контейнере на закрытие ("залечивание") несплошностей в объеме заготовки оценивали следующим образом. Несплошности моделировали сквозными отверстиями, выполненными в образцах параллельно образующей и разнесенными по радиусу от центра заготовок. Степень объемной деформации определяли по величине уменьшения или полного закрытия отверстий, причем измерения производили в разных точках по радиусу и по высоте образцов. Характер нагружения оценивали количеством циклов  $N$  (2 и 4), каждый из которых состоит из двух этапов, амплитудой угла закручивания (0,42 и 0,84 рад) и отношением угла закручивания во втором этапе к углу закручивания в первом, которое в каждом цикле поддерживалось постоянным значением (0,5 и 1). Выбор максимального угла закручивания 0,84 рад связан с тем, что при больших амплитудах деформация локализуется в слое металла, прилегающем к вращающемуся пуансону.

Результаты опытов [8-9] показали, что использование закручивания при сжатии в различных вариантах приводит к более интенсивному уменьшению объема полости, чем при простом сжатии заготовки в контейнере. Во всех случаях увеличение числа циклов снижает размеры полости, причем наиболее интенсивно уменьшается объем полостей, расположенных вблизи вращающегося (активного) пуансона. С удалением от центра заготовки интенсивность уплотнения нарастает, что подтверждает положение о связи этого параметра с величиной деформации сдвига.

Для оценки влияния числа циклов нагружения на интенсивность закрытия полости с начальным диаметром  $d_0$  в процессе деформации получена следующая аппроксимирующая зависимость:

$$d/d_0 = A \exp(BN) + C, \quad (6)$$

где  $A, B, C$  - эмпирические константы;

$d$  – текущий диаметр полости.

При этом  $d/d_0 = C$  – уравнение асимптоты зависимости (6). Отсюда видно, что можно назначить такое число  $N$  (количество циклов), дальнейшее увеличение которого существенно не снижает размеры полости. Установлено, что при количестве циклов вращения пуансона выше шести интенсивность закрытия полости резко падает.

Поскольку степень деформации сдвига  $\Lambda$  - аддитивная величина, то с учетом формулы

$$\Lambda_i = \beta_i r/h$$

получим

$$\Lambda = \sum_1^n \Lambda_i = (r/h) \sum_1^{2N} |\beta_i|,$$

Затраты энергии  $A$  на деформацию могут быть вычислены по формуле

$$A = \int \tau_s \Lambda dV = 2\pi \tau_s \int_0^h \int_0^R r/h \sum_1^{2N} \beta_i r dr dz = \frac{2}{3} \pi R^3 \tau_s \beta_\Sigma,$$

т.е. затраты энергии на процесс могут быть оценены суммой амплитуд углов поворота пуансона  $\beta_\Sigma$ . Наилучшим следует считать такой вариант процесса, в котором при равных энергетических затратах эффект уплотнения окажется наибольшим. В связи с изложенным параметр  $\beta_\Sigma$  может стать аргументом, в функции которого может быть рассмотрено поведение величины  $d/d_0$  при различных схемах нагружения. Максимально эффективным оказалось сжатие заготовки с наибольшей амплитудой вращения пуансона и несимметричным циклом вращения. Наименьшая интенсивность уплотнения достигается при сжатии заготовки с малой амплитудой вращения пуансона и симметричным циклом нагружения.

В частном случае, при одностороннем закручивании, результаты опытов совпадают с закономерностями закручивания порошковой заготовки в контейнере [10].

При деформации порошковых заготовок с циклическим закручиванием [11] подтверждены приведенные выше закономерности



изменения интенсивности уплотнения от режимов знакопеременного кручения заготовок в контейнере. Для анализа напряженно-деформированного состояния порошковых заготовок возможно при-менить математический аппарат механики сплошных сред, в част-ности вариационные принципы с расширением их действия в область пластически сжимаемых материалов. Предложенные В.Л. Колмо-горовым [12] формулировки функционалов принципа возможных изменений напряженного и деформированного состояний позволи-ли описать поле плотности в объеме заго-товки вначале при простом сжатии в контейнере [13], а затем и при ее скру-чивании [14]. При решении последней задачи учитывали, что исходная плот-ность по сечению заготовки уже не распределяется равномерно из-за дей-ствия напряжений трения на контактных поверхностях. Вопрос заключается в том, усиливается ли эта неравномерность при закручивании или снижается. Выпол-ненные численными методами решения показали, что во всех случаях закручи-

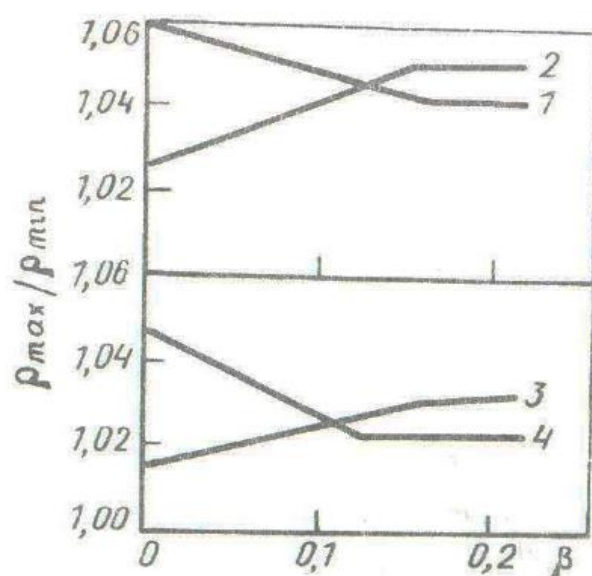


Рис. 4. Зависимости отношения максимальной и минимальной плотностей от угла закручивания при относительных координатах: 1 –  $r/R=0$ ; 2 –  $r/R=1$ ; 3 –  $z/h=0$ ; 4 –  $z/h=1$ .

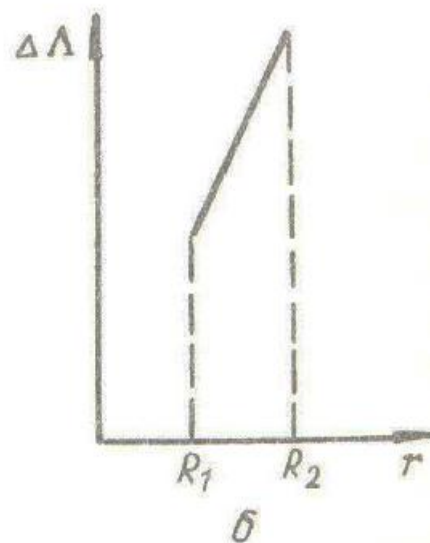
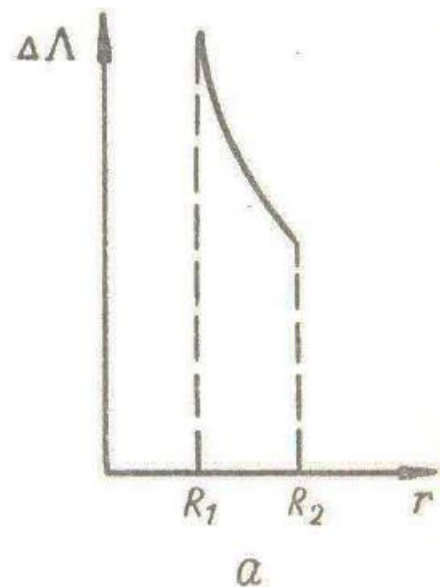


Рис. 5. Общий вид зависимости приращения степени деформации сдвига от ради-альной координаты при закручивании заготовки иглой (а) и закручивании торцами пуансонов (б).

вание заготовки благоприятно сказывается на равномерности распределения плотности, что находит свое отражение в уменьшении отношения максимальной в сечении плотности  $\rho_{\max}$  к минимальной  $\rho_{\min}$  (рис. 4). Наилучшие результаты достигаются для областей, примыкающих к центру активного пуансона, т.е. решается задача ликвидации зоны затрудненной деформации, характерной для схемы сжатия.

Использование схемы закручивания боковых сторон цилиндрических поверхностей полой заготовки приводит к появлению дополнительной составляющей тензора приращения деформации

$$\Delta \varepsilon_{\varphi r} = \frac{1}{2} \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u_{\varphi}}{r} \right) + \frac{1}{r} * \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right] = -\frac{1}{2} \gamma \frac{R_1 R_2}{(R_2 - R_1) r}$$

где  $\gamma$  – угол закручивания, отсюда приращение степени деформации сдвига

$$\Delta \Lambda = \frac{1}{2} \gamma \frac{R_1 R_2}{(R_2 - R_1) r}.$$

Поскольку текущий радиус находится в знаменателе, то с увеличением  $r$  сдвиговые деформации в заготовке снижаются (рис. 5). В случае деформации порошковой заготовки плотность также будет уменьшаться от центра к периферии. Таким образом, характер распределения деформаций (сдвиговых и объемных) по радиальной координате противоположен схеме закручивания торцов заготовки. При необходимости выравнивания деформаций по радиальной координате целесообразно использовать сочетание двух схем процесса, результатом чего является суммирование эпюр деформации. Совместно с сотрудниками ВИЛСа [2] установлено, что для достижения оптимального варианта соотношение между углом закручивания боковой поверхности и углом закручивания торцов должно удовлетворять условию

$$\frac{\gamma}{\beta} = R_2 / h_1 (1 - R_1 / R_2).$$

Отсюда следует вывод о необходимости применения комбинированных схем нагружения для обеспечения равномерного распределения деформаций по сечению заготовки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982. 584 с.

2. А.с. СССР № 1690946. БИ, 1991, № 42, с. 61.
3. А.с. СССР № 1315134. БИ, 1987, № 22, с. 38.
4. Богатов А.А., Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н. и др. - Известия вузов. Черная металлургия, 1988, № 10, с. 31-35.
5. Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н., Богатов А. А. - Известия вузов. Черная металлургия, 1987, № 12, с. 45-49.
6. Колмогоров В.Л., Логинов Ю.Н. Примеры применения вариационного принципа виртуальных напряжений и перемещений в задачах формоизменения некомпактных сред. Деп. рук. в ВИНТИ, № 1384-В89 от 28.02.89.
7. Логинов Ю.Н., Богатов А.А., Загиров Н.Н. – Известия вузов. Машиностроение, 1987, № 6, с. 122-125.
8. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности при обработке давлением. М.: Металлургия, 1983.
9. Логинов Ю.Н., Богатов А.А., Загиров Н.Н. - Известия вузов. Черная металлургия, 1988, К» 2, с. 54-58.
10. Богатов А.А., Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н. – Известия вузов. Машиностроение, 1988, № 6, с. 31-35.
11. Богатов А.А., Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н. и др. – Технология легких сплавов, 1989, № 2, с. 45-49.
12. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
13. Логинов Ю.Н. Формоизменение пористого цилиндра при осадке. В кн.: Обработка металлов давлением. Свердловск; изд. УПИ, 1986.